第65卷 第2期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 2
2024年3月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Mar., 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.02.004

大型射电望远镜主反射面调整方法研究*

孙正雄[1†] 王锦清[1,2,3] 虞林峰[1] 张志斌[1] 王广利[1,4]

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)
(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210023)
(3 上海市空间导航与定位技术重点实验室 上海 200030)
(4 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 随着毫米波天文学和空间通信的重要性日益提高, 对天线性能提出了越来越高的要求, 而天线性能往往受到其反射器表面精度的限制. 微波全息技术是一种快速有效的检测反射面天线表面轮廓的测量技术. 通过微波全息测量得到天线口径场, 计算天马65 m射电望远镜反射面与理想抛物面的偏差. 天马65 m射电望远镜的主反射面板是放射状的, 有14圈. 面板的每个角都固定在面板下方促动器的螺栓上进行上下移动, 且相邻面板交点处的拐角共用一个促动器. 采用平面拟合的方法可以计算各块面板拐角处的调整值, 但是同一个促动器会得到4个不同的调整量. 通过平面拟合, 同时以天线照明函数为权重的平差计算方法得到相邻面板拐角的一个平差值, 即天马65 m射电望远镜1104个促动器的最佳调整值. 通过多次调整和新算法的应用, 天马65 m射电望远镜反射面的面形精度逐渐提高到了0.24 mm.

关键词 望远镜: 射电, 面形误差, 天线效率; 方法: 微波全息, 数据分析

中图分类号: P161; **文献标识码**: A

1 引言

大型反射面射电望远镜的表面精度检测, 可以使望远镜在高频波段仍然保持高效率工作. 射电望远镜的主反射面通常由多块面板拼接组成, 以尽可能高的精度排列这些面板, 才能让天线主反射面具有理想的表面轮廓. 射电望远镜表面精度主要有两个方面的限制: 一是面板的机械制造误差和装配精度; 二是天线主反射面板的排列, 受自身重力、温度、风载等复杂环境因素的影响. 然而, 天线不是所有的变形都可以预测, 必须进行测量, 才能进行有效的补偿[1−2]. 因此, 为了维持天线高频波段的电气性能, 必须定期检查天线主反射面的表面精度. 这意味着必须通过有效和准确的诊断程序来检测面板错位, 并在可能时进行调整. 为了测量射电望远镜主反射面的形状, 经纬仪测量、全站仪测量、激光跟踪测量、摄影测量等测量技术相继出现[3]. 本文采用的微波全息法是一种反射面轮廓重建的逆方法. 它需要测量天线远场辐射图的幅值和相位, 根据天线近场与远场的傅里叶变化关系计算出口径面相位[4]. 通过几何光学将口径面相位与表面偏离抛物面的偏差联系起来, 进而对天线表面进行调整来提高天线的性能.

微波全息测量技术的一个局限性是在实践中

2022-11-25收到原稿, 2023-01-31收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11903068、12273097), 国家重点研发计划(2021YFC2203501)资助

†zxsun@shao.ac.cn

只能测量到完整辐射图的一小部分. 这是因为测量时间必须最小化, 以避免外界干扰. 在测量远离天线主波束的旁瓣电平时也存在实际困难. 由于只测量主波束附近的一个区域, 孔径内高空间频率对应的远场信息会有所丢失, 因此天线面板表面误差图中的细节结构会被平滑掉. 大多数大型反射面都是由面板拼接而成的, 面板偏离会导致表面误差在高空间频率下不连续. 在这种情况下, 低分辨率全息测量得到的面板位置可能是错误的[5].

微波全息测量有相位恢复法和相位相关法(或叫干涉仪法). 其中相位恢复法是在测到天线远场幅度特性后, 通过天线辐射模型推导出相位特性. 此方法不需要参考信号, 但需要信噪比较高的信号源, 这种全息方法常在口径分辨率较低的情况下使用. 相位相关法需要一面小口径天线接收目标源信号作为参考信号, 用互相关的方法测量相位信息[6–7].

新型大口径反射面天线通常采用主反射面控制系统快速、便捷地调节主反射面面形来维持天线高频观测的效率. 天马65 m射电望远镜是一个口径为65 m的全实心面板的卡塞格伦天线. 为了解决天线高、低仰角观测中出现重力变形引起的散焦问题, 天线安装的六联杆机构驱动的副面可以根据天线仰角高度位置实时调整副面姿态来维持天线电性能[8]. 此外, 天马65 m射电望远镜主反射面还装配了可调控制系统, 来调整天线面形, 补偿天线主反射面在高、低仰角上重力变形造成的效率损失[9]. 天马65 m射电望远镜主反射面系统由安装在天线面板下方的1104个促动器和一套控制系统组成. 每个促动器有4颗螺栓, 相邻面板的4个拐角固定在同一个促动器的4颗螺栓上. 当1104个促动器上下移动时, 1008块面板也相应上下移动.

2 微波全息测量

为了方便大型反射面天线的制造和安装, 主反射面通常由多个单面板组成. 对于标准抛物面反射天线, 费马原理表明从焦点到口径平面的光程距离是相等的. 因此, 当在抛物面焦点处向任意方向辐射电磁波被标准抛物面反射面反射时, 口径平面上的波前相位值处处相等[10]. 然而, 天线面板的实际情况并非如此. 由于天线面板的安装精度和支撑结构的重力变形等因素, 天线面板不再是一个完全标准的抛物面, 这将导致天线口径面上的相位不相等. 由此, 我们可以根据全息测量原理建立实际抛物面偏离标准抛物面位置的位移与天线口径面相位差的关系. 通过检测这个相位差, 理论上可以确定反射面的变形. 可以对抛物面天线的口径场积分得到辐射场, 计算公式如下[11]:

$$T(u,v)=\frac{\mathrm{i}}{\lambda}\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}kR}}{R}\int F(\xi,\eta)\exp[-\mathrm{i}k(\xi u+\eta v)]\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\eta\,, \tag{1}$$

上式中, λ表示天线接收信号的波长, $k=2\pi/\lambda$, R表示天线口面到远场的距离, i表示虚数单位, $F(\xi,\eta)$为天线口径场, 其中(ξ,η)表示口径场上的坐标, $T(u,v)$为天线辐射场, (u,v)表示辐射场方向矢量在口径场上的投影坐标. 天线口径场和远场之间存在二维傅里叶变化关系. 图1为假设天马65 m射电望远镜口径场的相位处处相等, 根据(1)式仿真计算天线的远场辐射图.

天线在实际观测过程中随着反射面精度的降低, 天线面板的反射效率将明显下降, 这将直接影响射电望远镜的孔径效率, 特别是工作在高频下的射电望远镜. 表面精度为ε (mm)的抛物面天线对效率的影响可表示为[12]:

$$\eta_{\mathrm{s}}=\exp\left[-\left(\frac{4\pi\varepsilon}{\lambda}\right)^2\right]\,, \tag{2}$$

上式中, η_{s}表示与理想面型的天线效率的比值, ε表示天线实际反射面与理想抛物面偏差的均方根. 因此, 对于仅1/16波长的误差, 灵敏度被降低到最大值的一半. 为了将损耗限制为10%, 误差必须不大于波长的1/40. 此外, 天线面形误差还影响天线方向图主瓣和旁瓣的结构. 因此, 精确测量反射面天线的表面精度并补偿面形误差对反射面天线具有重要意义[13–14]. 对于天马65 m射电望远镜在高频观测时需要实时调整天线面形来补偿效率损失.

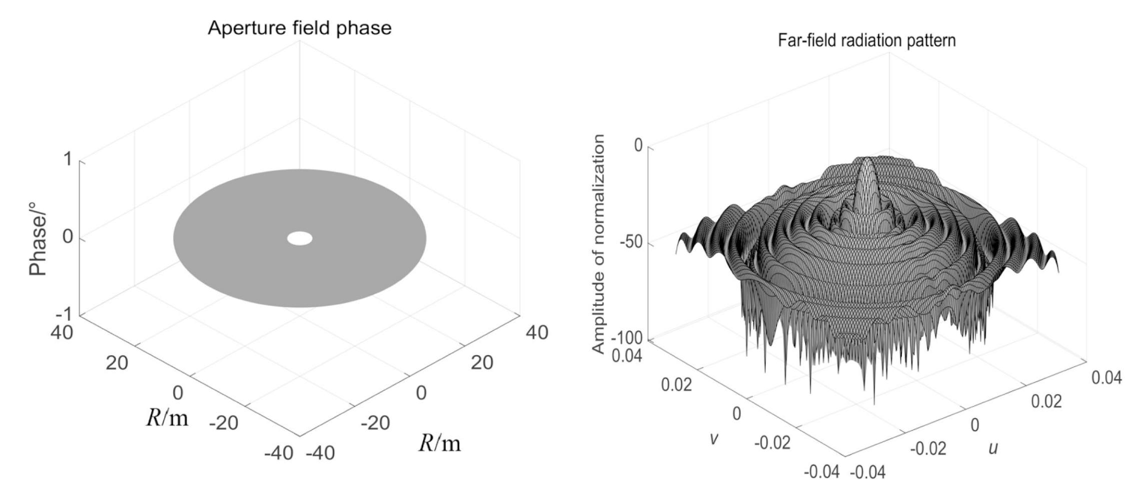


图 1 天马65 m射电望远镜口径场和辐射场的仿真图

Fig. 1 Aperture field and far-field simulation pattern of the Tianma 65 meter radio telescope

在实际测量过程中, 测量天线的远场辐射, 通过傅里叶逆变换反推出天线口径场, 从而计算出天线反射面与理想抛物面的偏差. 图2显示了天线面板微小变形导致从馈源到口径面的光程差变化[15].

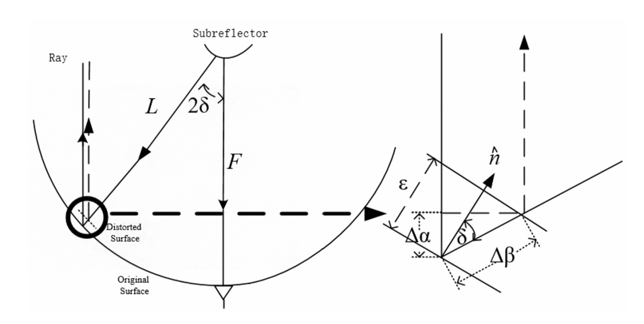


图 2 天线面板微小变形导致从馈源到口径面的光程差变化

Fig. 2 The effect of a small normal surface error ε on the ray path from the feed to the aperture plane

在图2中假设天线面板凸起ε的距离, 则从天线馈源到天线口径面的光程差变化$\Delta\alpha+\Delta\beta$可以用下式表示:

$$\Delta\alpha+\Delta\beta=\frac{\varepsilon}{\cos\delta}+\frac{\varepsilon\cos 2\delta}{\cos\delta}=2\varepsilon\cos\delta\,, \tag{3}$$

其中, δ为面板凸起处的法向量$\hat{n}$与信号传播路径的夹角. 对于抛物面天线, 从焦点到反射面上任何一点的距离L可以表示为:

$$L=\frac{2F}{1+\cos 2\delta}=\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\sin 2\delta}\,, \tag{4}$$

上式中, x和y为天线反射面上该点在口径面上的投影坐标; F为反射天线的焦距. δ的余弦函数可以由下式推导出来:

$$\cos\delta=\frac{2F}{\sqrt{x^2+y^2+4F^2}}\,. \tag{5}$$

因此, 天线反射面的表面误差ε与天线口径面相位φ的关系可以通过下式计算:

$$\varphi=2\pi\frac{2\varepsilon\cos\delta}{\lambda}\,. \tag{6}$$

天线的辐射远场与天线表面误差之间的关系为:

$$\varepsilon(x,y)=\frac{\lambda}{4\pi}\sqrt{1+\frac{x^2+y^2}{4F^2}}\mathrm{Phase}\left\{\mathrm{e}^{\mathrm{i}2kF}F^{-1}[T(u,v)]\right\}\,, \tag{7}$$

其中, $F^{-1}[\cdots]$是二维傅里叶反变换, Phase表示相位.

3 天线主动面系统补偿计算

天马65 m射电望远镜的主反射面由14圈共1008块面板拼接组成. 在高频观测时, 根据建立的主动面模型, 实时调整天线面形下方促动器的升降, 从而补偿高低俯仰角上的面形精度. 其主反射面板的分布如图3所示, 图中网格交点处即为可上下移动的促动器.

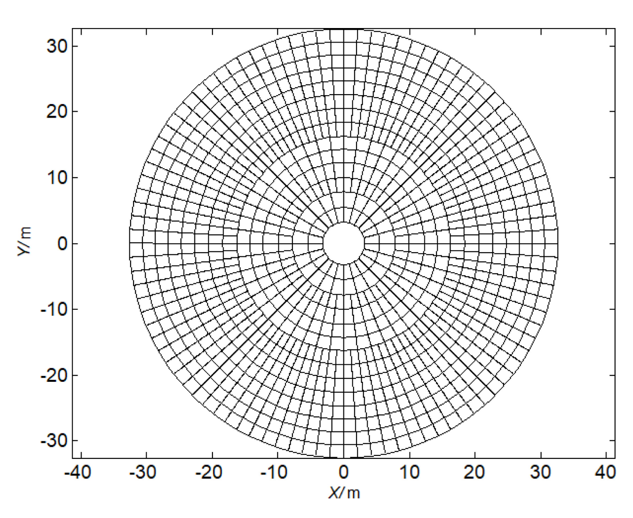


图 3 天马65 m射电望远镜主反射面面板分布图

Fig. 3 The main reflector panel distribution of the Tianma 65 meter radio telescope

3.1 平面拟合计算面板调整量

在实际测量的过程中, 得到的是天线远场的幅度和相位. 天线口径面上的幅度和相位是对远场辐射进行二维傅里叶逆变化计算得到的. 数据处理时, 需要对远场数据进行"网格化"处理, 并且把网格点数设置为2的整数次幂, 以便应用快速二维傅里叶逆变换. 通过对天马65 m射电望远镜进行全息测量, 最终得到了一个512 × 512天线面形误差的数据矩阵. 全息测量的最终目的是确定每块面板4个拐角的位置调整量(提高或降低面板).

天马65 m射电望远镜主反射面板的每块面板的4个拐角可以通过促动器远程进行上下移动. 为了找到指定面板的调整值, 必须先把得到的512 × 512数据矩阵映射到每块面板上. 由此得到每块面板上若干个要调整的点, 然而每块面板只有4个拐角可调整. 又因为每块面板比天线主反射面小得多且又是刚性材质, 因而可以把天线面板当做一个平面, 利用平差原理得到该面板若干个调整点的平面方程, 进而根据面板的4个角的坐标求出4个角的调整量. 在程序计算时, 需要给面板和促动器编号, 以便计算结果和实际面板、促动器对应上. 图4为天马65 m射电望远镜面板、促动器编号样例. 面板上的数字表示面板编号, 面板交点处的数字表示促动器编号. 两者都采用两个变量建立索引, 圈数是第1级索引, 从左向右依次增加, 个数是第2级索引, 逆时针计数. 程序计算给定促动器调整量时需要确定该促动器控制的2个或4个面板的对应编号. 对于第3圈和第7圈促动器, 由于内外圈面板个数相差一倍, 在个数索引时可以分奇、偶数分别进行索引.

对于全息测量得出的天线面形误差数据矩阵, 需要将矩阵中的每个数据的坐标点乘以比例因子, 映射到实际面板坐标上. 例如, 为了确定编号9–5面板的调整量, 可以根据该面板的内径和外径以及起始角和终止角进行判定. 由于天线主反射面的第9圈面板由相同的96块面板拼接而成. 因此, 每块面板的张角为3.75°, 即编号9–5面板的起始和终止角分别为15°和18.75°. 另外第9圈面板的内外径分别为20.570 m和22.666 m. 可以根据判定条件从原始数据矩阵中得出分布在编号9–5面板上的183个调整量, 如图5所示, 且该面板平均向上凸起了0.52 mm.

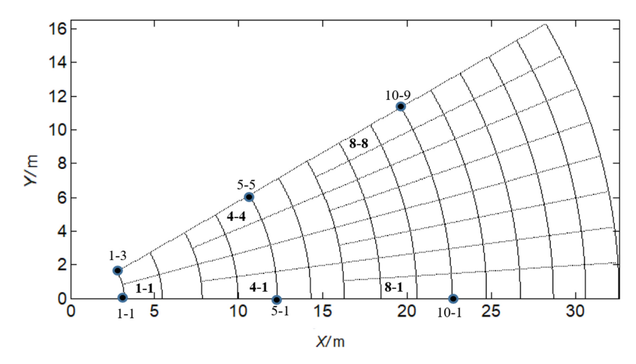


图 4 天马65 m射电望远镜面板、促动器索引编号样例

Fig. 4 Example of index number of panel and actuator for the Tianma 65 m radio telescope

早期对天线面板全息测量时, 得到上述测量结果后, 将该值作为面板4个角的应调整值, 然后对同一个点处相邻面板拐角的应调整值进行平均计算得到该点的调整量. 对于天马65 m射电望远镜, 我们可以根据平差原理对每块面板对应的调整量进行平面拟合, 得到平面方程, 求出面板4个角的调整量, 然后将平均相邻面板交点处的调整值作为该点促动器的调整量. 天马65 m射电望远镜目前正采用

该方法计算各促动器的调整值, 来补偿天线主反射面的变形. 程序计算中, 平面拟合方程如下:

$$ax + by + c = z\,, \tag{8}$$

上式中a、b、c为平面拟合系数, z为面板上(x, y)点位置处的应调整值. 根据间接平差的函数模型, 建立了误差方程, 如下式:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_{n-1} \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n-1} & y_{n-1} & 1 \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{n-1} \\ z_n \end{bmatrix}, \tag{9}$$

上式中n为单块面板上全息测量的调整数据个数, v_i表示误差值, (x_i, y_i)表示面板上的坐标点, z_i表示坐标点处的应调整值. 根据间接平差的方程可解得平面方程系数值.

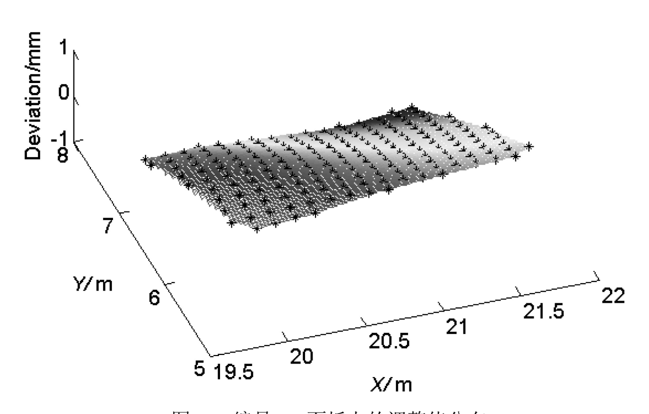


图 5 编号9–5面板上的调整值分布

Fig. 5 Distribution of adjustment values on No.9–5 panel

在计算出每个面板的平面拟合系数后, 再根据(8)式和该面板4个角的坐标, 即可确定该面板4个点的调整量. 显然4个相邻面板交点的调整值有4个不同的值. 如何根据计算的4个不同值来确定促动器的调整值, 是一个值得研究的问题. 目前天马65 m射电望远镜以这4个值的平均值为依据来调整促动器. 图6为天马65 m射电望远镜在一次全息测量后采用平面拟合, 取面板拐角处的平均值计算出1104个促动器的调整值. 其中横轴为促动器的索引个数(从内圈向外圈按照促动器编号依次增加), 左边纵轴为促动器的调整值, 用“*”表示, 右边纵轴为解算各个促动器调整值的中误差RMSE (Root Mean Square Error), 用“o”表示. 由于边缘区域全息测量精度急剧下降, 最外圈面板测量不准确, 天马65 m射电望远镜不会调整最外圈促动器. 从图中可以看出, 部分促动器的调整值相对较大, 这主要是副反射面支撑腿对部分面板有一定的遮挡造成的. 通过采用平面拟合的方法进行反复全息测量和迭代确定促动器的调整值, 最终使表面精度逐渐提高到0.38 mm (RMS, Root Mean Square), 实现了天马65 m射电望远镜在高频波段的高精度观测. 该结果扣除了副反射器支撑腿和最外层面板的模糊部分.

3.2 解算带有约束条件的促动器调整值

通过对每个促动器的多个调整量取平均值来最终确定主动面模型, 显然不是最佳的调整方法. 在此基础上我们可以添加约束条件, 令相邻面板方程解算出拐角处的调整量相等. 图7所示是编号为4–2、4–3、5–2和5–3的4块面板片接示意图. 图中4块面板的交点处为同时控制4块面板上下移动的促动器, 其中$x_{10} = x_{20} = x_{30} = x_{40}$, $y_{10} = y_{20} = y_{30} = y_{40}$, 都表示促动器的坐标. 我们可以采用附有限制条件的间接平差来求解此类问题, 即约束条件为: $z_{10} = z_{20} = z_{30} = z_{40}$. 此外, 以天马65 m射电望远镜的照明函数确定每块面板的权重. 由于天线是对称结构, 所以每圈面板的权重相等. 图8为天马65 m射电望远镜口径面幅度分布函数, 即照明函数. 在实际平差计算中, 以每圈面板的中心点半径对应的照明函数值确定该圈面板的权重.

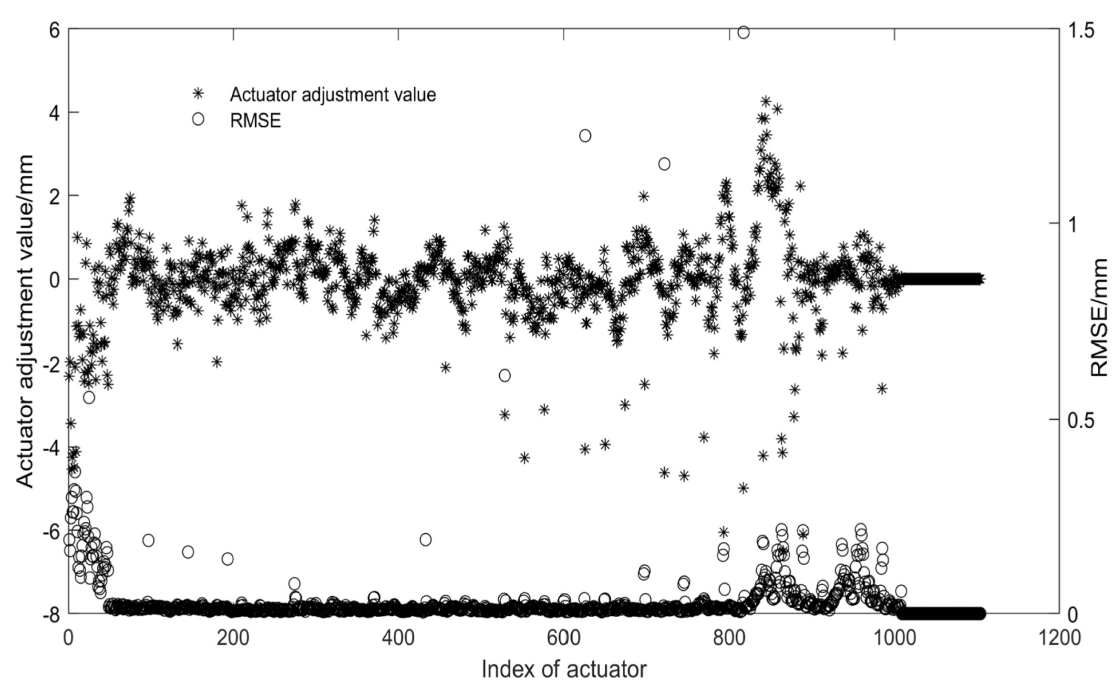


图 6　1104个促动器的调整值及RMSE

Fig. 6　The adjustment values and RMSE of 1104 actuators

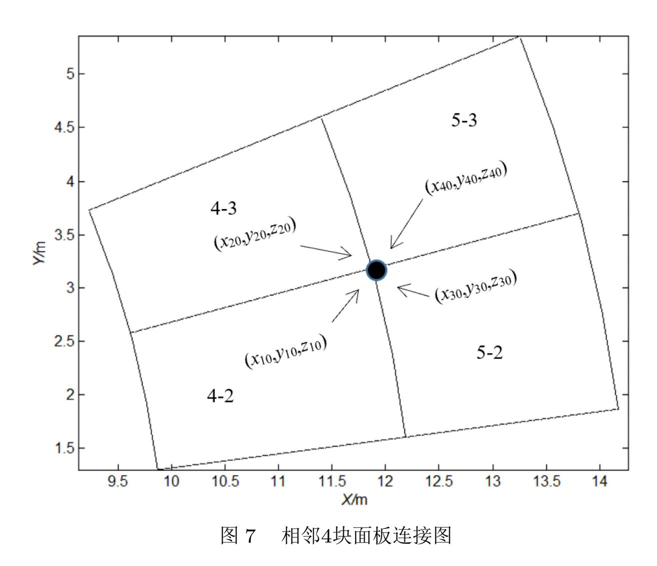


图 7　相邻4块面板连接图

Fig. 7　Connection diagram of four adjacent panels

为了计算出促动器的最优调整值, 即求解z_{10}, 可以根据附有限制条件的间接平差函数模型公式[16]:

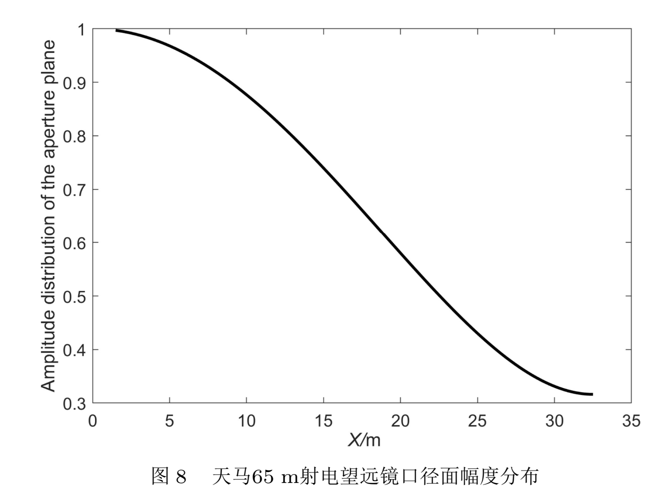


图 8　天马65 m射电望远镜口径面幅度分布

Fig. 8　Amplitude distribution of the aperture plane of the Tianma 65 m radio telescope

$$\begin{cases} \boldsymbol{V} = \boldsymbol{B} \times \boldsymbol{x} - \boldsymbol{l}\,, \\ \boldsymbol{C} \times \boldsymbol{x} + \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{x}} = 0\,. \end{cases} \tag{10}$$

实际促动器调整方程式建立如下:

$$
\left\{
\begin{array}{l}
\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix}
x_{11} & y_{11} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
x_{12} & y_{12} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\
x_{1n} & y_{1n} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
x_{10} & y_{10} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & x_{21} & y_{21} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & x_{22} & y_{22} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\
0 & 0 & 0 & 0 & x_{2n} & y_{2n} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & x_{20} & y_{20} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{31} & y_{31} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{32} & y_{32} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{3n} & y_{3n} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{30} & y_{30} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{41} & y_{41} & 1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{42} & y_{42} & 1 & 0\\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{4n} & y_{4n} & 1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{40} & y_{40} & 1 & 0
\end{bmatrix}
\times
\begin{bmatrix} a_1\\ b_1\\ c_1\\ z_{10}\\ a_2\\ b_2\\ c_2\\ z_{20}\\ a_3\\ b_3\\ c_3\\ z_{30}\\ a_4\\ b_4\\ c_4\\ z_{40} \end{bmatrix}
-
\begin{bmatrix} z_{11}\\ z_{12}\\ \vdots\\ z_{1n}\\ 0\\ z_{21}\\ z_{22}\\ \vdots\\ z_{2n}\\ 0\\ z_{31}\\ z_{32}\\ \vdots\\ z_{3n}\\ 0\\ z_{41}\\ z_{42}\\ \vdots\\ z_{4n}\\ 0 \end{bmatrix}\\
\begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1
\end{bmatrix}
\times
\begin{bmatrix} a_1\\ b_1\\ c_1\\ z_{10}\\ a_2\\ b_2\\ c_2\\ z_{20}\\ a_3\\ b_3\\ c_3\\ z_{30}\\ a_4\\ b_4\\ c_4\\ z_{40} \end{bmatrix}
+
\begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 0 \end{bmatrix}
=0\,.
\end{array}
\right.
\tag{11}
$$

解算结果如下[16]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{N}_{\rm BB} = \boldsymbol{B}^{\rm T} \times \boldsymbol{P} \times \boldsymbol{B}\,, \\ \boldsymbol{W} = \boldsymbol{B}^{\rm T} \times \boldsymbol{P} \times \boldsymbol{l}\,, \\ \boldsymbol{N}_{\rm CC} = \boldsymbol{C} \times \boldsymbol{N}_{\rm BB}^{-1} \times \boldsymbol{C}^{\rm T}\,, \\ \boldsymbol{x} = (\boldsymbol{N}_{\rm BB}^{-1} - \boldsymbol{N}_{\rm BB}^{-1} \times \boldsymbol{C}^{\rm T} \times \boldsymbol{N}_{\rm CC}^{-1} \times \boldsymbol{C} \times \\ \qquad \boldsymbol{N}_{\rm BB}^{-1}) \times \boldsymbol{W} - \boldsymbol{N}_{\rm BB}^{-1} \times \boldsymbol{C}^{\rm T} \times \boldsymbol{N}_{\rm CC}^{-1} \times \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{x}}\,, \end{cases} \tag{12}$$

上式中, 第1行公式表示间接平差观测方程, $\boldsymbol{V}$表示残差向量, $\boldsymbol{x}$为参数向量, $\boldsymbol{l}$为观测向量, $\boldsymbol{B}$为设计矩阵, 它反映了观测量与未知参数之间的线性关系, 第2行公式表示附加的约束条件与未知参数之间的关系, $\boldsymbol{C}$为约束条件矩阵, $\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{x}}$为自由项, 用于满足给定的约束条件. (11)式中, (x_{1i}, y_{1i})表示第1块面板中全息测量点的坐标值, z_{1i}表示该坐标点的应调整值. (x_{10}, y_{10})为促动器的坐标值, z_{10}为待求值, a_1、b_1、c_1为面板1的平面拟合方程系数. (12)式中, 为简化待求未知参数的表达式, 分别令$\boldsymbol{N}_{\rm BB}$、$\boldsymbol{W}$和$\boldsymbol{N}_{\rm CC}$表示等式右边的矩阵多项式, 其中矩阵$\boldsymbol{P}$为权阵. 例如图7中编号为4–2、4–3、5–2和5–3的4块面板的n值分别为210、213、217、217. 在求解图7中促动器的调整量时, 此时矩阵$\boldsymbol{B}$为861行16列, 同时参数向量$\boldsymbol{x}$中包含待求参数, 最后解算结果中$z_{10} = z_{20} = z_{30} = z_{40}$, 该值即为促动器的调整量.

天马65 m射电望远镜有15圈促动器, 如图3所示. 第1圈和第15圈的每个促动器控制两块面板的相邻角. 计算这两圈促动器的调整值, 同样可以构造调整方程式. 与(11)式相比, 参数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & z_{10} & a_2 & b_2 & c_2 & z_{20} \end{bmatrix}^{\rm T},$$

此时矩阵$\boldsymbol{B}$和矩阵$\boldsymbol{C}$需要根据实际参数与观测量之间的线性关系进行更改. 我们将促动器连接的两圈面板称为内圈和外圈, 第3圈和第7圈促动器连接的外圈面板是内圈的2倍. 对于这两圈促动器, 当2级索引为奇数时, 促动器控制4块相邻面板的拐角, 当2级索引为偶数时, 控制2块相邻面板的拐角. 如图9所示为第7圈偶数促动器连接面板图. 该促动器不与内圈面板相连, 而是与内圈面板的外边B_1D_1在中间位置o点相切, 且连接C_2点和A_3点. 对于奇数促动器, 连接4块面板, 在计算时和上述方法一样, 只是程序计算时, 需要注意促动器连接的内圈面板的2级索引号.

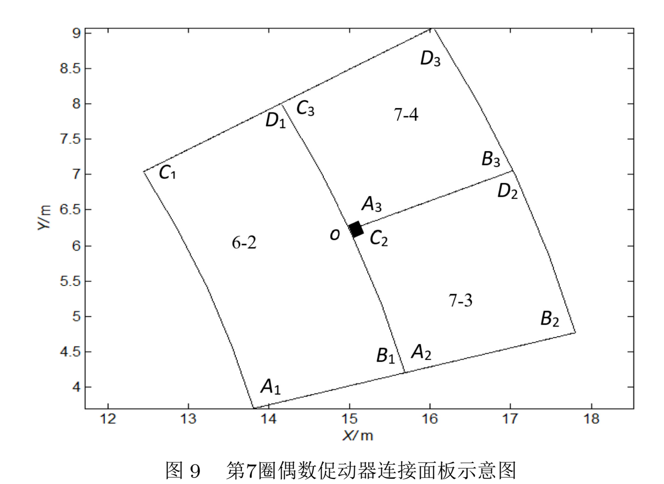


图 9　第7圈偶数促动器连接面板示意图

Fig. 9　Diagram of the 7th ring actuators with even number index connected two rings panels

在调整图9中促动器移动时(向上或向下)内圈面板将不会升高或降低. 为了在调整之后天线面板不会有凸起或凹陷的角, 而且保持平滑, 在计算促动器的调整值时, 我们必须考虑内圈面板外边沿未连接到促动器的o点. 在计算第3圈和第7圈偶数促动器时, 我们要求C_2点、A_3点和o点的应调整值相等. 在计算图9中促动器的调整值时, 同样可以构造调整方程式. 与(11)式相比, 参数矩阵为:

$$\begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 & z_{10} & a_2 & b_2 & c_2 & z_{20} & a_3 & b_3 & c_3 & z_{30} \end{bmatrix}^{\rm T},$$

此时对应的矩阵$\boldsymbol{B}$和矩阵$\boldsymbol{C}$同样需要根据实际参数与观测量之间的线性关系进行更改.

通过全息测量天线口径相位, 采用带约束条件的平差计算方法得到天马65 m射电望远镜1104个促动器的调整值, 如图10所示. 其中横轴为促动器的索引个数, 左边纵轴为促动器的调整值, 调整量用“*”表示, 右边纵轴为解算各个促动器调整值的中误差, 用“∘”表示. 图11显示第3圈促动器在相邻的4块或3块面板中的调整值和带约束条件求解促动器调整值的对比情况, 其中不带约束条件求解时, 同一个促动器分别在相邻面板中解析得到不同

的多个调整值, 带约束条件求解时, 同一个促动解算得到一个最优的值. 其中奇数促动器连接4块面板, 偶数促动器连接2块面板, 且与内圈面板的外边沿在中间位置相切. 图中标记“∘”为促动器调整值分别在相邻面板上的解, “+”为带约束条件下促动器调整值的解.

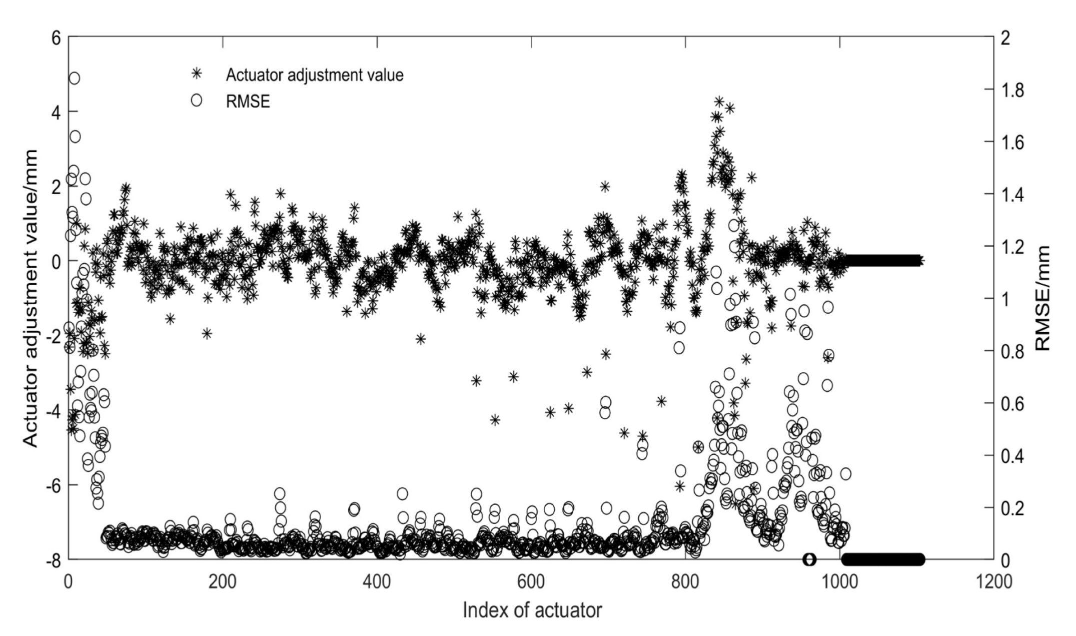


图 10　1104个促动器调整量的平差值及中误差

Fig. 10　The survey adjustment values and RMSE of 1104 actuators

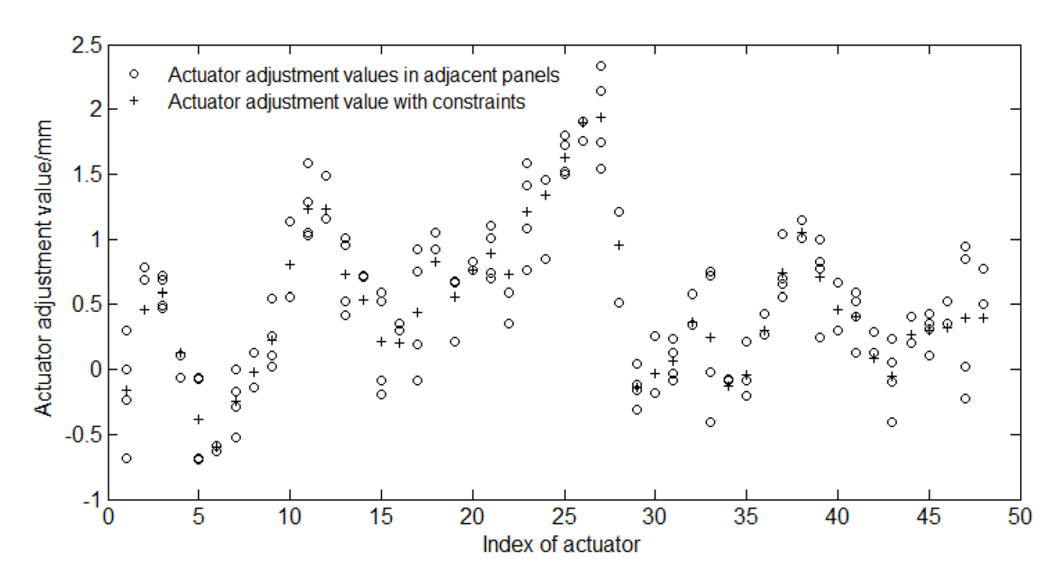


图 11　第3圈促动器在带约束条件和不带约束条件两种情况求解时的调整值对比

Fig. 11　The comparison of the adjustment values of the third actuator in the two cases with and without constraints

促动器调整值的计算结果显示, 在带有约束条件下求解促动器的调整值介于单独面板计算的2个或4个调整值之间. 从图11可以看出, 第3圈促动器的一些偶数促动器的调整值超出了范围, 这是因为图9中的o点的调整值没有显示, 所以按照取平均值的方法或不约束图9中的o点计算促动器的调整值, 可能会导致部分面板有凸起. 采用带约束条件的平差方法建立天马65 m射电望远镜的主动面模型, 可优化面形精度至0.24 mm (RMS), 如图12所示.

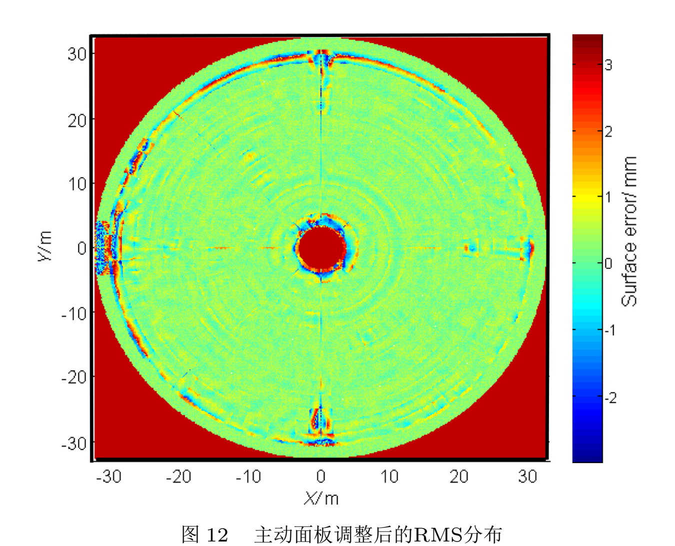


图 12　主动面板调整后的RMS分布

Fig. 12　RMS distribution after active panel adjustment

最外圈面板测量精度下降主要有两个原因: 一是射电望远镜照明函数的锥度特性会使信噪比降低导致测量精度降低; 其次, 天线背架的外边沿受环境的影响更大. 因此, 我们将最外层面板的数据视为无效数据.

4　总结

射电全息测量通常用于测量反射面天线孔径场的相位分布, 并确定反射面与理想形状的偏差. 本文主要研究了大型射电望远镜主动面系统调整计算方法, 介绍了射电望远镜的孔径相位与面板偏差之间的关系, 详细描述了采用附有限制条件的平差方法和平面拟合方法建立天马65 m射电望远镜的主动面系统模型. 这种计算促动器调整值的新算法最终取得了令人满意的结果, 为其他具有主动面系统的大型射电望远镜提供了参考.

参 考 文 献

[1] Morris D. ITAP, 1985, 33: 749
[2] Morris D, Baars J W M, Hein H, et al. A&A, 1988, 203: 399
[3] 李宗春, 李广云, 吴晓平. 测绘通报, 2003, 6: 16
[4] Nikolic B, Richer J, Hills R E. Proceedings of General Assembly of URSI, 2002, 11: 1
[5] Rahmat-Samii Y. ITAP, 1985, 33: 1194
[6] Morris D, Hein H, Steppe H, et al. IPMAP, 1988, 135: 61
[7] Rochblatt D J. TDAPR, 1988, 42
[8] Sun Z X, Wang J Q, Chen L. RAA, 2016, 16: 119
[9] 王锦清, 左秀婷, MICHAEL Kesteven, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47: 099502
[10] 董健, 付丽, 蒋甬斌, 等. 天文学报, 2016, 57: 219
[11] 王锦清, 虞林峰, 范庆元, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 2011: 136
[12] Ruze J. IEEEP, 1966, 54: 633
[13] 殷兴辉, 徐之材, 韩溥, 等. 电波科学学报, 2000, 15: 229
[14] 韩溥, 吕静, 吴文达, 等. 天文学报, 1994, 35: 209
[15] Bryan J. ALMA Memo, 2003: 479
[16] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础. 第3版. 武汉: 武汉大学出版社, 2014: 171-180

Adjustment Method of Main Reflector for a Large Radio Telescope

SUN Zheng-xiong[1] WANG Jin-qing[1,2,3] YU Lin-feng[1] ZHANG Zhi-bin[1] WANG Guang-li[1,4]

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)
(2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(3 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030)
(4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The performance of the antennas, which plays an important role in millimeter-wave astronomy and space communication, is often limited by their reflector surface accuracy. Microwave holography is a fast and effective technique for measuring the surface profile of reflector antenna. In this paper, the antenna aperture phase profile is obtained by microwave holography to estimate the deviation between the reflector and the ideal paraboloid of the Tianma 65 m radio telescope. The panels of the Tianma 65 m radio telescope is in radial pattern with 14 rings. Each corner of the panel is fixed on the screw of the actuator to move up and down, and the adjacent corners of the four panels share an actuator. We use the method of plane fitting to calculate the adjustment value of every panels corner. But one actuator, which simultaneously controls the common corner of the adjacent panels, will have different adjustment values according to the plane fitting equation based on adjacent panels. In this paper, an adjustment value at the corner of the adjacent panel is obtained by plane fitting and adjustment calculation method with the antenna illumination function as the weight, that is, the optimal adjustment value of 1104 actuators of the Tianma 65 m radio telescope. Through many adjustments and the application of new algorithms, the surface accuracy of the reflector of the Tianma 65 m radio telescope has gradually improved to the current 0.24 mm.

Key words telescopes: radio, surface deviation, antenna efficiency; methods: microwave holography, data analysis